

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ДИАМЕТРА ТРУБОПРОВОДА С УЧЕТОМ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

А. Б. Голованчиков<sup>1</sup>, Т. А. Дулькин<sup>2</sup>,  
Н. А. Прохоренко<sup>1</sup>, Н. А. Меренцов<sup>1</sup>

*Кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,  
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (1),  
natasha292009@yandex.ru; г. Волгоград, Россия;  
ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» (2), г. Москва, Россия*

**Ключевые слова:** гидравлическое сопротивление; диаметр трубы; капитальные затраты; ламинарное, переходное и турбулентное течения; оборотные средства; общая стоимость; оптимизация; энергозатраты.

**Аннотация:** Дано описание алгоритма расчета оптимального диаметра трубопровода и его технологических параметров с учетом энергозатрат, связанных с гидравлическим сопротивлением, амортизационных отчислений на капитальные затраты и оборотных средств на эксплуатацию и ремонт. Приведены примеры расчетов для газо- и нефтепровода и раствора полимера, с турбулентным, переходным и ламинарным течениями жидкостей и газа. В каждом случае в зависимости от числа Рейнольдса выбирается в расчетах коэффициент сопротивления для гидравлически гладких труб или рассчитывается по известным формулам Никурадзе и Блазиуса или автомоделного режима течения с учетом шероховатости. Показано, что необходимая мощность насоса или компрессора в зависимости от вышеназванных режимов течения зависит от диаметра трубопровода  $d_t^{-4}$  – для ламинарного потока,  $d_t^{-4,75}$  – для переходного режима течения и  $d_t^{-5}$  – для турбулентного течения.

---

### Введение

Затраты, связанные с эксплуатацией трубопроводов от магистральных до внутрицеховых, включают в себя стоимость электроэнергии, затрачиваемой на работу насосов или компрессов для преодоления линейных и местных гидравлических потерь, амортизационных отчислений на капитальные затраты и оборотных средств на эксплуатацию и ремонт. Обычно основную долю в суммарных затратах занимают вышеназванные энергозатраты. Поэтому основное внимание в научных и проектных работах уделяется снижению гидравлического сопротивления [1 – 3]. Основные методы здесь связаны с уменьшением эффективной вязкости и шероховатости стенок трубы. В работах [4 – 8] также предложено несколько способов и устройств для уменьшения гидравлического сопротивления, связанных прежде всего с созданием маловязкого пристенного кольцевого слоя газа или жидкости. Но здесь основной проблемой остается неустойчивость пристенного кольцевого маловязкого слоя. При ламинарном течении он «теряется» через несколько километров, при переходном и турбулентном – смешивается с основным потоком перекачиваемой жидкости через несколько сот метров.

## Алгоритм расчета

Ниже описывается алгоритм расчета оптимального диаметра трубы и его технологических параметров, обеспечивающих минимум суммарных затрат энергии, капитальных затрат и оборотных средств при турбулентном течении газа [9], к которым добавлены алгоритмы расчета трубопровода для жидкостей при их переходном и турбулентном течении. В таблице 1 даны исходные и справочные данные и результаты расчетов для турбулентного течения природного газа, переходного течения нефти и ламинарного течения раствора [9].

Таблица 1

**Исходные и справочные данные, расчетные параметры программы «трубаорт»**

Наименование	Размерность	Обозначение		Значение		
		литература	про-грамма	газ	раствор	нефть тяжелая
1	2	3	4	5	6	7
Исходные данные						
Производительность	м <sup>3</sup> /ч	$q_v$	$qv$	6000	400	600
Длина трубопровода	м	$l_t$	$lt$	4000	4000	4000
Справочные данные						
Молекулярная масса	кг/кмоль	$M$	$M$	16	–	–
Температура	°С	$t$	$t$	15	15	15
Давление среднее	ата	$p$	$p$	1,15	2,9	1,43
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	$\rho$	0,754	900	1050
Вязкость при рабочей температуре	м <sup>2</sup> /с	$\mu$	$\mu$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	0,25	0,07
К.П.Д. привода насоса или компрессора	–	$\chi$	$kcu$	0,5	0,5	0,5
Стоимость электроэнергии	р/(кВт·ч)	$C_l$	$Cl$	3	3	3
Амортизационные отчисления за 1 м длины и 1 м диаметра в год	р/(м <sup>2</sup> ·год)	$A_k$	$Ак$	18	18	18
Отчисления за ремонт и обслуживание		$A_{oc}$	$Aoc$	13,5	13,5	13,5
Коэффициент трения для потока	–	$\lambda$	$lam$	0,03	0,039	0,035
Доля потерь давления от местных сопротивлений по сравнению с линейными потерями давления	–	$\Delta p_l$	$dpl$	0,1	0,1	0,1
Расчетные параметры						
Плотность при рабочей температуре и давления (для газа)	кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	$\rho_{og}$	0,754	900	1050
Постоянный коэффициент при расчете гидравлического сопротивления	–	$K_{\Delta p}$	$Kdp$	201,4	4529,4	1096,6

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Коэффициент стоимости электроэнергии	–	$a_1$	$a_1$	$6,87 \cdot 10^6$	$1,08 \cdot 10^7$	$3,95 \cdot 10^6$
Коэффициент стоимости амортизационных отчислений	–	$a_2$	$a_2$	$1,26 \cdot 10^5$	$1,26 \cdot 10^5$	$1,26 \cdot 10^5$
Расчетный диаметр трубы	м	$d_t$	$d_t$	0,392	0,311	0,419
Гидравлические сопротивления трубопровода	Па	$\Delta p$	$\Delta p$	21761	$4,86 \cdot 10^5$	$6,85 \cdot 10^4$
Скорость в трубе	м/с	$v_g$	$v_g$	13,1	1,46	1,21
Число Рейнольдса	–	$Re_g$	$Re_g$	$3,36 \cdot 10^5$	1639,7	6518,8
Мощность привода	кВт	$N$	$N$	34,37	53,9	11,42
Потеря давления	атм	$\Delta p_a$	$\Delta p_a$	0,222	4,95	0,7
Стоимость электроэнергии	р/год	$E$	$E$	742 365	$1,17 \cdot 10^6$	246 643
Стоимость амортизационных отчислений за капитальные затраты		$E_k$	$E_k$	28 222,6	22 374	30 150
Стоимость оборотных средств		$E_e$	$E_e$	21 167	16 780,5	22 612
Общая стоимость затрат		$E_o$	$E_o$	791 754,8	$1,2 \cdot 10^6$	$2,99 \cdot 10^5$
Общий объем перекачиваемой среды	м <sup>3</sup>	$V_{об}$	$V_{об}$	$4,32 \cdot 10^7$	$2,88 \cdot 10^6$	$4,32 \cdot 10^6$
Затраты на транспортировку 1000 м <sup>3</sup>	р/год	$C_t$	$C_t$	18,32	418,36	69,3
Доля электроэнергии в общей стоимости	–	$O_e$	$O_e$	0,938	0,968	0,824
Доля амортизационных отчислений за капитальные затраты	–	$O_{ке}$	$O_{ке}$	0,036	0,019	0,101
Доля оборотных средств в общей стоимости	–	$O_{ее}$	$O_{ее}$	0,027	0,014	0,076

Примечание. 1. «–» – прочерк в справочных данных означает, что для жидкостей плотность задается при рабочей температуре, а для газов рассчитывается в пункте 1 представленного алгоритма.

2. «||» – скобки в справочных данных означают, что коэффициент трения рассчитывается для ламинарного режима  $\lambda = 64 / Re$ , для переходного –  $\lambda = 0,316 / Re^{0,25}$  [8].

1. Плотность перекачиваемого газа при рабочей температуре и давлении

$$\rho_g = \frac{M}{22,4} \left( \frac{273}{273+t} \right) \left( \frac{p}{1,003} \right),$$

(плотности жидкостей задаются в табл. 1 при рабочем давлении и температуре).

## 2. Объемный расход газа при рабочем давлении и температуре

$$\rho_{vp} = (q_v/3600) \left( \frac{1,033}{p} \right) \left( \frac{273+t}{273} \right);$$

– для жидкостей

$$\rho_{vp} = q_v/3600.$$

## 3. Общие потери давления по длине и от местных сопротивлений:

а) для турбулентного режима,  $Re > 10^4$ , гидравлическое сопротивление

$$\Delta p = K_{\Delta p} / d_t^5,$$

где  $K_{\Delta p} = 1,1\lambda l_t \rho_g (q_{vp}/0,785)^2 / 2$ ;  $\lambda$  – функция шероховатости;

– коэффициент стоимости электроэнергии

$$a_1 = 7200c_1 q_{vp} K_{\Delta p};$$

– коэффициент стоимости амортизационных отчислений за капитальные затраты и оборотных средств

$$a_2 = (A_k + A_{oc}) l_t;$$

– расчетный диаметр трубопровода

$$d_t = (a_2/5a_1)^{1/6};$$

– скорость

$$v_g = q_{vp} / (0,785d_t^2);$$

– число Рейнольдса

$$Re_g = v_g d_t \rho_g / \mu_g;$$

– мощность электроэнергетической установки

$$N = q_{vp} K_{\Delta p} / 1000 d_t^5;$$

б) для переходного режима,  $2320 < Re < 10000$ , гидравлическое сопротивление

$$\Delta p = K_{\Delta p} / d_t^{4,75},$$

где  $K_{\Delta p} = 0,282 l_t (\mu_g \rho_g)^{0,75} q_{vp}^{1,75}$ ;

$$a_1 = 7200c_1 q_{vp} K_{\Delta p};$$

$$d_t = (a_2/4,75a_1)^{1/5,73};$$

$$N = q_{vp} K_{\Delta p} / 1000 d_t^{4,75};$$

$$\lambda = \frac{0,316}{Re_g};$$

в) для ламинарного режима,  $Re < 2320$ , гидравлическое сопротивление

$$\Delta p = K_{\Delta p} / d_t^4,$$

где  $K_{\Delta p} = 32\mu_g \rho_g q_{vp} / 0,785$ ;

$$a_1 = 7200c_l q_{vp} K_{\Delta p};$$

$$d_t = (a_2 / 4a_1)^{1/5};$$

$$N = q_{vp} K_{\Delta p} / 1000d_t^4;$$

$$\lambda = \frac{64}{Re_g}.$$

4. Гидравлическое сопротивление в атмосферах

$$\Delta p_a = \Delta p / 9,81 \cdot 10^4.$$

5. Стоимость электроэнергии за год

$$E = 7200c_l N.$$

6. Стоимость амортизационных отчислений за капитальные затраты

$$E_k = A_k l_t d_t.$$

7. Стоимость оборотных средств

$$E_e = A_{oc} l_t d_t.$$

8. Общие затраты

$$E_o = E + E_k + E_e.$$

9. Общий объем перекачиваемой жидкости или газа за год

$$V_{об} = 7200q_v.$$

10. Затраты на транспортировку  $1000 \text{ м}^3$  перекачиваемой жидкости или газа в год

$$C_t = 1000 E_o / V_{об}.$$

11. Доля затрат в общих затратах:

а) на электроэнергию

$$O_e = E / E_o;$$

б) на амортизационные отчисления от капитальных затрат

$$O_{ке} = E_k / E_o;$$

в) на оборотные средства

$$O_{еe} = E_e / E_o.$$

## Результаты расчетов

Результаты расчетов представлены выше (см. табл. 1).

Необходимая мощность насоса или компрессора в зависимости от вышеназванных режимов течения зависит от диаметра трубопровода  $d_t^{-4}$  для ламинарного потока,  $d_t^{-4,75}$  – для переходного режима течения и  $d_t^{-5}$  – для турбулентного течения. Обратные зависимости от диаметра мощности, а значит газовых затрат на электроэнергию и прямо пропорциональные зависимости амортизационных отчислений и оборотных средств в суммарной стоимости всех этих годовых затрат позволяют минимизировать суммарные годовые затраты после приравнивания к нулю производной от суммарных затрат. Анализ результатов расчетов показывает, что наибольшее влияние на долю в общих затратах оказывают энергозатраты, связанные в основном с вязкостью перекачиваемой среды и в меньшей степени с турбулизацией потока. Доля энергозатрат в эксплуатации трубопровода для раствора даже при ламинарном его течении составляет более 96 %, для газа, движущегося в турбулентном режиме – около 94 %, а для нефти в переходном режиме – менее 83 %. Вторыми по величине затрат являются амортизационные отчисления, которые изменяются в пределах 2 – 10 %, а эксплуатационные расходы не превышают 3 % от общей стоимости перекачивания жидкостей или газа по трубопроводу. При скорости газа, в 10 раз большей скорости нефти, и соответственно большем его расходе, оптимальные диаметры трубопроводов являются практически одинаковыми и составляют около 400 мм, а для скорости растворов в трубопроводе, расход раствора в котором в 15 раз меньше расхода газа и в 1,5 раза меньше расхода нефти, оптимальный диаметр должен составить около 500 мм, то есть на 20 % больше, чем для газо- и нефтепровода. Последнее также объясняется значительно большей вязкостью раствора, которая в 3,5 раза больше вязкости нефти и в 20 тысяч раз больше вязкости газа, так как при ламинарном движении раствора энергозатраты в наибольшей степени зависят от вязкости.

## Заключение

Результаты расчетов показывают, что наибольшее влияние на потери давления, а значит и энергозатраты на перекачивание жидкости, оказывает ее вязкость. Так, вязкость раствора в 3,5 раза больше вязкости нефти, в  $2 \times 10^4$  раз больше вязкости воздуха и, хотя раствор перекачивается в ламинарном режиме ( $Re = 1640$ ), нефть в переходном  $Re = 6519$ , а газ в турбулентном и расход раствора в 1,5 раза меньше, чем для тяжелой нефти, и в 15 раз меньше, чем для газа, потери давления на одинаковой длине в 12,4 раза больше, чем для нефти, и в 22,3 раза больше, чем для газа. Соответственно, доля энергозатрат, составляющая 96,8 % от общей стоимости эксплуатации трубы трубопровода с учетом амортизационных отчислений и оборотных средств на капремонт и обслуживание, выше, чем для нефте- и газопроводов. То же касается и затрат на транспортировку  $1000 \text{ м}^3$  каждого из вышеперечисленных веществ – для трубопровода в 6 раз больше, чем для нефтепровода и в 22,8 раза больше, чем для газопровода. Отметим, что во всех случаях выдерживается рекомендуемая скорость газов (10...30) м/с и жидкостей (1...2) м/с.

Заниженный по расчету оптимальный диаметр трубопровода для раствора, по сравнению с диаметрами нефте- и газопроводов (последние отличаются в среднем на 3,5 %), объясняется меньшей производительностью.

Таким образом, разработанный алгоритм расчетов оптимальных технологических параметров и диаметра трубопровода для жидкостей и газов с учетом различного режима течения в них веществ позволяет минимизировать суммарные энергетические затраты, амортизационные отчисления на капитальные затраты и оборотные средства на эксплуатацию и ремонт трубопровода.

### Список литературы

1. Алиев, Р. А. Трубопроводный транспорт нефти и газа : учебник для вузов / Р. А. Алиев, В. Д. Белоусов, А. Г. Немудров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1988. – 368 с.
2. Коннова, Г. В. Оборудование транспорта и хранения нефти и газа : учеб. пособие для вузов / Г. В. Коннова. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2006. – 128 с.
3. Мастобаев, Б. Н. Химические средства и технологии в трубопроводном транспорте нефти / Б. Н. Мастобаев, А. М. Шаммазов, Э. М. Мовсумзаде. – М. : Химия, 2002. – 296 с.
4. Голованчиков, А. Б. Теоретические основы течения жидкостей в трубопроводе с маловязким пограничным слоем / А. Б. Голованчиков, А. В. Ильин, Л. А. Ильина. – Волгоград : ВолгГТУ, 2008. – 92 с.
5. Пат. 2262035 Российская Федерация, МПК F17D 1/14, F15D 1/02. Способ перемещения вязких нефтей и нефтепродуктов / А. Б. Голованчиков, Л. А. Ильина, А. В. Ильин, Н. А. Дулькина, А. Б. Дулькин, Е. Н. Конопальцева ; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет. – № 2004109505/06 ; заявл. 29.03.2004 ; опубл. 10.10.2005, Бюл. № 28. – 7 с.
6. Пат. 2285198 Российская Федерация, МПК F17D 1/20, F15D 1/06. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе / А. Б. Голованчиков, Л. А. Ильина, А. В. Ильин, Н. А. Дулькина, А. Б. Дулькин, Д. С. Карашук ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Волгоградский государственный технический университет. – № 2005107289/06 ; заявл. 15.03.2005 ; опубл. 10.10.2006, Бюл. № 28. – 5 с.
7. Пат. 2241868 Российская Федерация, МПК F15D 1/06, F17D 1/20. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе / А. Б. Голованчиков, А. В. Ильин, Л. А. Ильина, В. Ф. Лобойко, М. В. Якушко ; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет. – № 2003110552/06 ; заявл. 14.04.2003 ; опубл. 10.12.2004, Бюл. № 34.
8. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1987. – 576 с.
9. Свидетельство о гос. рег. программ для ЭВМ № 2019615073. Программа для расчета технологических и экономических параметров и оптимального диаметра трубопровода для перекачивания жидкостей и газов / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Н. А. Меренцов, Т. А. Дулькин (РФ). Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 18 апреля 2019.

---

## Optimization of Technological Parameters and Diameter of the Pipeline, Taking into Account Energy and Resource Conservation

A. B. Golovanchikov<sup>1</sup>, T. A. Dulkin<sup>2</sup>, N. A. Prokhorenko<sup>1</sup>, N. A. Merentsov<sup>1</sup>

*Department of Processes and Apparatuses of Chemical and Food Production,  
Volgograd State Technical University (1),  
natasha292009@yandex.ru; Volgograd, Russia;  
Peoples' Friendship University of Russia (2), Moscow, Russia*

**Keywords:** hydraulic resistance; pipe diameter; capital expenditures; laminar, transitional and turbulent flows; current assets; total cost; optimization; energy costs.

**Abstract:** A description of an algorithm for calculating the optimum diameter of a pipeline and its technological parameters, is given taking into account energy costs associated with hydraulic resistance, depreciation deductions for capital costs and working capital for operation and repair. Examples of calculations for gas and oil pipelines and polymer solutions with turbulent, transitional and laminar flows of liquids and gas are given. In each case, depending on the Reynolds number, the drag coefficient for hydraulically smooth pipes is selected in the calculations or calculated according to the well-known formulas of Nikuradze and Blasius or the self-similar flow regime taking into account the roughness. It is shown that the required pump or compressor power, depending on the above flow regimes, depends on the diameter of the pipeline  $d_t^{-4}$  – for laminar flow,  $d_t^{-4,75}$  – for transitional flow regime, and  $d_t^{-5}$  – for turbulent flow.

### References

1. Aliyev R.A., Belousov V.D., Nemudrov A.G. *Truboprovodnyy transport nefiti i gaza: uchebnik dlya vuzov* [Pipeline transport of oil and gas: a textbook for universities], Moscow: Nedra, 1988, 368 p. (In Russ.)
2. Konnova G.V. *Oborudovaniye transporta i khraneniya nefiti i gaza: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Equipment for transport and storage of oil and gas: a study guide for universities], Rostov-on-Don: Feniks, 2006, 128 p. (In Russ.)
3. Mastobayev B.N., Shammazov A.M., Movsumzade E.M. *Khimicheskiye sredstva i tekhnologii v truboprovodnom transporte nefiti* [Chemical means and technologies in pipeline transportation of oil], Moscow: Khimiya, 2002, 296 p. (In Russ.)
4. Golovanchikov A.B., Il'in A.V., Il'ina L.A. *Teoreticheskiye osnovy techeniya zhidkostey v truboprovode s malovyazkim pogranichnym sloyem* [Theoretical foundations of the flow of liquids in a pipeline with a low-viscosity boundary layer], Volgograd: VolgGTU, 2008, 92 p. (In Russ.)
5. Golovanchikov A.B., Il'ina L.A., Il'in A.V., Dul'kina N.A., Dul'kin A.B., Konopal'tseva Ye.N. *Sposob peremeshcheniya vyazkikh neftey i nefteproduktov* [Method of moving viscous oils and oil products], Russian Federation, 2005, Pat. 2262035. (In Russ.)
6. Golovanchikov A.B., Il'ina L.A., Il'in A.V., Dul'kina N.A., Dul'kin A.B., Karashchuk D.S. *Ustroystvo dlya umen'sheniya gidravlicheskiykh poter' v truboprovode* [A device for reducing hydraulic losses in a pipeline], Russian Federation, 2006, Pat. 2285198. (In Russ.)
7. Golovanchikov A.B., Il'in A.V., Il'ina L.A., Loboyko V.F., Yakushko M.V. *Ustroystvo dlya umen'sheniya gidravlicheskiykh poter' v truboprovode* [A device for reducing hydraulic losses in a pipeline], Russian Federation, 2004, Pat. 2241868. (In Russ.)
8. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [Examples and tasks for the course of processes and devices of chemical technology], Leningrad: Khimiya, 1987, 576 p. (In Russ.)
9. Golovanchikov A.B., Prokhorenko N.A., Merentsov N.A., Dul'kin T.A. *Programma dlya rascheta tekhnologicheskikh i ekonomicheskikh parametrov i optimal'nogo dia-metra truboprovoda dlya perekachivaniya zhidkostey i gazov* [Program for calculating the technological and economic parameters and the optimal diameter of the pipeline for pumping liquids and gases], Russian Federation, 2019, Certificate of state registration of computer programs No. 2019615073. (In Russ.)

## Optimierung der technologischen Parameter und des Rohrdurchmessers unter Berücksichtigung der Energie- und Ressourcenschonung

**Zusammenfassung:** Es ist ein Algorithmus zur Berechnung des optimalen Durchmessers einer Rohrleitung und ihrer technologischen Parameter unter Berücksichtigung der mit dem Hydraulikwiderstand verbundenen Energiekosten, der Abschreibungsabzüge für Kapitalkosten und des Betriebskapitals für Betrieb und Reparatur beschrieben. Es werden Beispiele für Berechnungen für Gas- und Ölpipelines und Polymerlösungen mit turbulenten, Übergangs- und laminaren Strömungen von Flüssigkeiten und Gas angegeben. In jedem Fall wird abhängig von der Reynolds-Zahl der Widerstandskoeffizient für hydraulisch glatte Röhre in den Berechnungen ausgewählt oder nach den bekannten Nikuradze- und Blasius-Formeln oder dem selbstmodellierten Strömungsregime unter Berücksichtigung der Rauheit berechnet. Es ist gezeigt, dass die erforderliche Leistung der Pumpe oder des Kompressors in Abhängigkeit von den obigen Strömungsregimen vom Durchmesser der Rohrleitung abhängt,  $d_t^{-4}$  - für laminare Strömung,  $d_t^{-4,75}$  - für Übergangsströmungsregime und  $d_t^{-5}$  - für turbulente Strömung.

---

## Optimisation des paramètres technologiques et du diamètre du pipeline compte tenu des économies d'énergie et de ressources

**Résumé:** Est donnée la description de l'algorithme du calcul du diamètre optimal de la canalisation et de ses paramètres technologiques compte tenu des coûts énergétiques liés à la résistance hydraulique, des amortissements sur les dépenses de capital et des fonds de roulement pour l'exploitation et la réparation. Sont cités des exemples des calculs pour un gazoduc, un oléoduc et une solution de polymère, avec des courants circulaires, transitoires et laminaires des liquides et du gaz. Dans chaque cas, en fonction du nombre de Reynolds, est choisi le coefficient pour les calculs de la résistance des tubes hydrauliques lisses ou bien calculé selon les formules connues de Nikuradze et Blasius ou le mode de courant automatique en tenant compte de la rugosité. Est démontré que la puissance requise de la pompe ou du compresseur en fonction des modes d'écoulement ci-dessus dépend du diamètre de la conduit  $d_t^{-4}$  – pour l'écoulement laminaire  $d_t^{-4,75}$  – pour le mode d'écoulement transitoire et  $d_t^{-5}$  – pour l'écoulement turbulent.

---

**Авторы:** *Голованчиков Александр Борисович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Дулькин Тимофей Александрович* – студент, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», г. Москва, Россия; *Прохоренко Наталья Андреевна* – аспирант кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Меренцов Николай Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия.

**Рецензент:** *Гермашев Илья Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Фундаментальная информатика и оптимальное управление», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград, Россия.